

## Beschreibung

Verfahren zum Erkennen einer Pendelung in einem elektrischen Energieversorgungsnetz

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erzeugen von mindestens einem eine Pendelung in einem elektrischen Energieversorgungsnetz anzeigenden Signal (Pendelsignal), bei dem von mindestens einer Phase des Energieversorgungsnetzes jeweils Phasenstrom und Phasenspannung unter Bildung von Phasenstrom- und Phasenspannungsabtwerten abgetastet werden, aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtwerten Impedanzwerte gebildet werden, die Impedanzwerte auf das Vorliegen einer Pendelung hin überwacht werden und bei Erkennung einer Pendelung mindestens ein Speicherelement gesetzt und an dessen Ausgang das Pendelsignal ausgegeben wird, nach Setzen des Speicherelementes weitere Impedanzwerte dahingehend überprüft werden, ob die festgestellte Pendelung noch anhält, bei Anhalten der Pendelung das Speicherelement unbeeinflusst bleibt und beim Aufhören der Pendelung das Speicherelement zurückgesetzt wird.

Ein derartiges Verfahren ist in der deutschen Offenlegungsschrift DE 195 03 626 A1 beschrieben. Bei diesem Verfahren werden nach dem Setzen des Speicherelementes weitere Impedanzwerte auf das Anhalten der festgestellten Pendelung hin überprüft, indem die zeitliche Änderung der Größe jeweils aufeinanderfolgender Impedanzwerte ermittelt wird und bei einer oberhalb eines Grenzwertes liegenden zeitlichen Änderung ein Aufhören der Pendelung erkannt und das Speicherelement zurückgesetzt wird. Die Festlegung eines solchen Grenzwertes erweist sich als schwierig, insbesondere dann, wenn in den Energieversorgungsnetzen eine Vielzahl von Generatoren verbunden sind und dadurch komplizierte Pendelungen entstehen können.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren anzugeben, mit dem stets sicher und zuverlässig das Pendelverhalten eines elektrischen Energieversorgungsnetzes festgestellt werden kann.

Diese Aufgabe wird bei einem Verfahren der eingangs angegebenen Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß bei der Überprüfung der weiteren Impedanzwerte ein Pendel-Modell benutzt wird, das aus vergangenen, zur Pendelung gehörenden Impedanzwerten oder aus von diesen Impedanzwerten abhängigen Größen gebildet ist; danach wird überprüft, ob ein aktuell gebildeter weiterer Impedanzwert oder eine von diesem weiteren Impedanzwert abhängige Größe vom Pendel-Modell abweicht, und es wird ein Auftreten eines weiteren Impedanzwertes oder einer von diesem Impedanzwert abhängigen Größe, welche von dem Pendel-Modell abweichen, als ein Aufhören der Pendelung gewertet.

Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, daß mit dem Pendel-Modell auch komplizierte Pendelungen beschrieben werden können und somit auch bei solchen komplizierten Pendelungen mit einer hohen Zuverlässigkeit das Aufhören der Pendelung erkannt werden kann.

Das Pendel-Modell kann vorteilhafterweise mittels eines Least-Squares-Schätzverfahrens ermittelt werden. Mit diesem Schätzverfahren kann aus aufeinanderfolgenden Impedanzwerten, welche nach dem Setzen des Speicherelementes, also nach Beginn der Pendelung gebildet wurden, ein mathematisches Pendel-Modell erzeugt werden.

Für dieses Pendel-Modell kann als Modellansatz eine Funktion der Form  $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$  mit den Parametern  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$

verwendet werden, bei der ein oder mehrere Parameter vor Beginn des Schätzverfahrens als Null festgelegt werden können. Somit können als Modellansatz Potenzfunktionen erster, zweiter oder dritter Ordnung angewandt werden.

- 5 Weiterhin kann als Modellansatz für das Pendel-Modell eine Summe aus zeitlich abklingenden Sinus- und Cosinusfunktionen verwendet werden. Mit diesen Modellansätzen ist es möglich, auch komplizierte Pendelungen mathematisch zu beschreiben.
- 10 Das Pendel-Modell kann direkt für die ermittelten Impedanzwerte der Pendelung oder auch für von diesen Impedanzwerten abhängige Größen gebildet werden. Als abhängige Größen können Resistanzwerte  $R$ , Reaktanzwerte  $X$ , zeitliche Ableitungswerte  $dZ/dt$  der Impedanz, zeitliche
- 15 Ableitungswerte  $dR/dt$  einer Resistanz oder zeitliche Ableitungswerte  $dX/dt$  einer Reaktanz verwendet werden. Durch Wahl der am besten geeigneten Größe für das Pendel-Modell kann das Aufhören der Pendelung mit einer hohen Zuverlässigkeit bestimmt werden, wobei die Wahl der Größe von
- 20 der individuellen Netzkonfiguration des elektrischen Energieversorgungsnetzes abhängt.

- In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung können aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtwerten
- 25 Mitsystemimpedanzwerte gebildet werden, und für alle Phasen des Energieversorgungsnetzes ein gemeinsames Speicherelement bereitgestellt und ein gemeinsames Pendelsignal erzeugt werden. Diese Variante ist anwendbar, wenn eine Aussage über eine in allen Phasen des Energieversorgungsnetzes
- 30 gleichzeitig auftretende Pendelung getroffen werden soll.

- In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens können aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtwerten jeweils einer auf Pendelung zu
- 35 untersuchenden Phase des Energieversorgungsnetzes Phasen-

Impedanzwerte gebildet und für jede dieser Phasen ein eigenes Speicherelement bereitgestellt und ein eigenes Pendelsignal erzeugt werden. In dieser Ausführungsform kann für jede einzelne Phase des Energieversorgungsnetzes getrennt das

5 Pendelverhalten untersucht, also sowohl der Beginn als auch das Aufhören einer Pendelung erkannt werden. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn Pendelungen nur in einigen, nicht aber in allen Phasen des

Energieversorgungsnetzes auftreten. Häufig treten derartige  
10 Pendelungen bei sog. einpoligen Pausen in Hochspannungsnetzen auf. Ursache für die Erzeugung von einpoligen Pausen sind die in Hochspannungsnetzen häufig anzutreffenden einpoligen Leiter-Erde-Fehler, bei denen ein Lichtbogen zwischen einem Leiter und der Erde gezündet wird. Bei diesem Fehler erzeugt

15 man eine einpolige Pause, d. h. man schaltet die eine Phase, in der der einpolige Leiter-Erde-Fehler aufgetreten ist, kurzzeitig ab. Dadurch erlischt der Lichtbogen und der Fehler ist oftmals behoben. Durch das einpolige Abschalten einer Phase kann es in den verbleibenden nicht abgeschalteten

20 Phasen zu Pendelungen kommen. Diese Pendelungen können beispielsweise nicht über eine Überwachung der Mitsystemimpedanzwerte erkannt werden, da Mitsystemimpedanzwerte nur bei Vorliegen von Abtastwerten aller Phasen des Energieversorgungsnetzes gebildet werden

25 können. Im Falle einer einpoligen Pause ist es nun sehr vorteilhaft, wenn man für jede Phase des Energieversorgungsnetzes ein eigenes Pendelsignal erzeugen kann; während der einpoligen Pause wird dieses Pendelsignal nur für die nicht abgeschalteten Phasen erzeugt. Das

30 Pendelverhalten des Energieversorgungsnetzes kann also für jede Phase individuell und unabhängig vom Zustand anderer Phasen bestimmt werden.

Die Phasen-Impedanzwerte der einzelnen Phasen des  
35 elektrischen Energieversorgungsnetzes können beispielsweise

gebildet werden, indem zur Bildung der Phasen-Impedanzwerte

- aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabstastwerten ( $i$ ,  $u$ ) der jeweiligen Phase eine den Realteil der

Phasenspannungsabstastwerte enthaltende Größe  $U_{re}$ , eine den

5 Imaginärteil der Phasenspannungsabstastwerte enthaltende Größe

$U_{im}$ , eine den Realteil der Phasenstromabstastwerte

enthaltende Größe  $I_{re}$  und eine den Imaginärteil der

Phasenstromabstastwerte enthaltende Größe  $I_{im}$  erzeugt wird,

- eine Phasen-Wirkleistungsgröße  $P$  gemäß

10  $P = U_{re} \cdot I_{re} - U_{im} \cdot I_{im}$  ermittelt wird,

- eine Phasen-Blindleistungsgröße  $Q$  gemäß

$Q = U_{im} \cdot I_{re} + U_{re} \cdot I_{im}$  ermittelt wird,

- eine quadrierte Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  gemäß

$I^2 = I_{re} \cdot I_{re} + I_{im} \cdot I_{im}$  ermittelt wird,

15 - mittels jeweils eines Least-Squares-Abschätzverfahrens

netzfrequente Anteile aus der Phasen-Wirkleistungsgröße  $P$ ,

der Phasen-Blindleistungsgröße  $Q$  und der quadrierten

Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  entfernt werden und

- Phasen-Resistanzwerte  $R$  gemäß  $R=P/I^2$  sowie Phasen-

20 Reaktanzwerte  $X$  gemäß  $X=Q/I^2$  und damit Phasen-

Impedanzwerte  $Z=R+jX$  ermittelt werden.

Bei der Bildung der Phasen-Impedanzwerte ist insbesondere die Entfernung der netzfrequenten Anteile (z.B. 50-Hz-Anteile)

25 aus der Phasen-Wirkleistungsgröße  $P$ , der Phasen-

Blindleistungsgröße  $Q$  und der quadrierten

Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  mittels jeweils eines Least-Squares-Abschätzverfahrens von Vorteil. Derartige

netzfrequente Störanteile würden die Auswertung der aus

30 diesen Größen ermittelten Phasen-Impedanzwerte

beeinträchtigen.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung sind in

Figur 1 ein Blockschaltbild eines Ausführungsbeispiels des

35 erfindungsgemäßen Verfahrens, in

Figur 2 ein Blockschaltbild der Bestimmung der Phasen-Impedanzwerte, in

Figur 3 die Impulsantworten der zur Impedanzbestimmung verwendeten Filter, in

5 Figur 4 Wirk- und Blindleistungsgrößenverläufe vor der Filterung und in

Figur 5 Wirk- und Blindleistungsgrößenverläufe nach der Filterung gezeigt.

- 10 In Figur 1 ist schematisch ein Verfahren zur Bestimmung des Pendelverhaltens eines dreiphasigen elektrischen Energieversorgungsnetzes gezeigt, mit dem für jede Phase des Energieversorgungsnetzes ein eigenes Pendelsignal Pd1, Pd2 und Pd3 erzeugt wird. Dazu sind drei Umschalter U1, U2 und U3
- 15 und drei Speicherelemente Sp1, Sp2 und Sp3 vorhanden; die Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Einheiten des Schemas sind dreipolig ausgeführt. Die Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerte  $i$  und  $u$  aller drei Phasen werden einer Einheit zur Impedanzbestimmung  $I_b$  zugeführt, an deren
- 20 Ausgang Phasen-Impedanzwerte  $Z$  der drei Phasen ausgegeben werden. Diese Phasen-Impedanzwerte  $Z$  werden über die Umschalter U1, U2 und U3 einer Pendelungserkennungseinheit  $P_e$  zugeführt. Die Pendelungserkennungseinheit  $P_e$  erkennt aus den zeitlichen Verläufen der Phasen-Impedanzwerte  $Z$  das Auftreten
- 25 einer Pendelung in den einzelnen Phasen, z.B. in Phase 1, und gibt an ihrem Ausgang für jede Phase mit erkannter Pendelung, z.B. für Phase 1, ein Pendelsetzsignal  $P_s$  aus. Das Pendelsetzsignal  $P_s$  setzt das der jeweiligen Phase zugeordnete Speicherelement, z.B. Sp1, welches an seinem
- 30 Ausgang das phasenindividuelle Pendelsignal, z.B. Pd1, ausgibt. Bei einem ausgegebenen Pendelsignal, z.B. bei Pendelsignal Pd1, wird der der jeweiligen Phase zugeordnete Umschalter, z.B. U1, umgeschaltet. Die weiterhin gebildeten Phasen-Impedanzwerte  $Z$  der Phase mit erkannter Pendelung,
- 35 z.B. der Phase 1, werden einer Pendelsignalsrücksetzeinheit  $P_{\bar{u}}$

zugeführt. Diese Pendelsignalrücksetzeinheit Pü erkennt ein  
Aufhören der Pendelung und gibt in diesem Fall an ihrem  
Ausgang ein Pendelrücksetzsignal Pr aus, welches das  
Speicherelement der jeweiligen Phase, z.B. Sp1, zurücksetzt.

- 5 Damit wird auch das Pendelsignal der jeweiligen Phase, z.B.  
Pd1, nicht mehr ausgegeben, und der jeweilige Umschalter,  
z.B. U1, geht wieder in seine Ausgangsstellung zurück. Eine  
Einheit zur Phasenauswahl Pa sorgt auf eine Anregung hin  
dafür, daß von der Pendelungserkennungseinheit Pe und der  
10 Pendelsignalrücksetzeinheit Pü jeweils die Phasen-  
Impedanzwerte der auf Pendelung zu untersuchenden Phasen  
bearbeitet werden.

- Im folgenden wird die Arbeitsweise der vier Einheiten  
15 Impedanzbestimmung Ib, Pendelungserkennungseinheit Pe,  
Pendelsignalrücksetzeinheit Pü und Phasenauswahl Pa näher  
erläutert.

- Entsprechend Fig. 2 werden in der Einheit Impedanzbestimmung  
20 Ib die Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerte  $i$  und  $u$   
mit Hilfe von orthogonalen FIR-Filtern F1, F2, F3 und F4  
gefiltert und damit eine den Realteil der  
Phasenspannungsabtastrwerte enthaltende Größe  $U_{re}$ , eine den  
Imaginärteil der Phasenspannungsabtastrwerte enthaltende Größe  
25  $U_{im}$ , eine den Realteil der Phasenstromabtastrwerte  
enthaltende Größe  $I_{re}$  und eine den Imaginärteil der  
Phasenstromabtastrwerte enthaltende Größe  $I_{im}$  erzeugt.

- In Fig. 3 sind die Impulsantworten der Filter F1 bis F4  
30 dargestellt, wobei die Impulsantwort der die Realteile  
bestimmenden Filter F1 und F3 mit "o" und die Impulsantwort  
der die Imaginärteile bestimmenden Filter F2 und F4 mit "+"  
gekennzeichnet sind.

Entsprechend Fig. 2 wird im Anschluß daran in Einheit 5 gemäß nachstehender Gl. (1) eine Phasen-Wirkleistungsgröße P und gemäß Gl. (2) eine Phasen-Blindleistungsgröße Q und in Einheit 6 gemäß Gl. (3) eine quadrierte Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  berechnet.

$$P = U_{re} \cdot I_{re} - U_{im} \cdot I_{im} \quad (1)$$

$$Q = U_{im} \cdot I_{re} + U_{re} \cdot I_{im} \quad (2)$$

$$I^2 = I_{re} \cdot I_{re} + I_{im} \cdot I_{im} \quad (3)$$

10

Danach werden die Phasen-Wirkleistungsgröße P, die Phasen-Blindleistungsgröße Q und die quadrierte Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  in Einheiten 7 und 8 gefiltert, um die in diesen Größen enthaltenen störenden 50-Hz-Anteile zu entfernen; es entstehen die gefilterten Größen P', Q' und  $I^{2'}$ . Das zu dieser Filterung benutzte Least-Squares-Abschätzverfahren wird weiter unten ausführlich erläutert.

15

20

Fig. 4 zeigt in einer oberen Darstellung a) den Verlauf der Wirkleistungsgröße P und in einer unteren Darstellung b) den Verlauf der Blindleistungsgröße Q vor der Filterung mittels Least-Squares-Abschätzverfahren jeweils über der Zeit t aufgetragen dargestellt.

25

Fig. 5 zeigt in einer oberen Darstellung a) den Verlauf der Wirkleistungsgröße P' und in einer unteren Darstellung b) den Verlauf der Blindleistungsgröße Q' nach der Filterung mittels Least-Squares-Abschätzverfahren; es ist deutlich zu erkennen, daß die 50-Hz-Anteile entfernt wurden.

30

Entsprechend Fig. 2 werden nach der Filterung in Einheit 9 Phasen-Resistanzwerte R und Phasen-Reaktanzwerte X gemäß Gl. (4) ermittelt und die daraus bestimmten Phasen-Impedanzwerte  $Z=R+jX$  am Ausgang der Einheit Impedanzbestimmung Ib ausgegeben.

35



$$R=P'/I^2 \quad X=Q'/I^2 \quad (4)$$

Zur Ausfilterung der in der Phasenwirkleistungsgröße  $P$ , der  
 5 Phasen-Blindleistungsgröße  $Q$  und der quadrierten  
 Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  enthaltenden 50-Hz-Anteile wird  
 ein Least-Squares-Abschätzverfahren mit einem Signalmodell  
 entsprechend Gl. (5) auf jede der Größen  $P$ ,  $Q$  und  $I^2$  getrennt  
 angewandt.

10

$$y_k = A \cdot e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\omega_0 k \cdot T_A) + B \cdot e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(\omega_0 k \cdot T_A) + C \quad (5)$$

Das Abschätzverfahren berechnet aus der quadrierten  
 Phasenstromamplitudengröße  $I^2$ , der Phasen-Wirkleistungsgröße  
 15  $P$  bzw. der Phasen-Blindleistungsgröße  $Q$  die Parameter  $A$ ,  $B$   
 und  $C$  des Signalmodells. Der Parameter  $C$  liefert die gesuchte  
 Größe der Phasen-Wirkleistungsgröße  $P'$ , der Phasen-  
 Blindleistungsgröße  $Q'$  bzw. der quadrierten  
 Phasenstromamplitudengröße  $I^2'$ . Die Summanden mit den  
 20 Parametern  $A$  und  $B$  bilden die 50-Hz-Anteile nach. Die Größe  
 $\omega_0$  ist die auszufilternde Frequenz (50 Hz) und  $T_A$  ist die  
 Abtastzeit.

Wenn für das Energieversorgungsnetz eine Ersatzschaltung mit  
 25 nur zwei Generator-Maschinen an den Enden einer  
 Energieübertragungsleitung betrachtet wird, klingt die  
 Amplitude der 50-Hz-Anteile mit der Zeitkonstanten  $\tau$  der  
 Summenimpedanz zwischen den beiden Generator-Maschinen gemäß  
 Gl. (6) ab, wobei  $L$  die Schleifeninduktivität und  $R$  die  
 30 Schleifenresistanz des Stromkreises, der sich über die beiden  
 Generator-Maschinen schließt, ist.

$$\tau = \frac{\sum L}{\sum R} \quad (6)$$

Die Koeffizienten A, B und C werden derart bestimmt, daß die Summe der Fehlerquadrate zwischen aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastwerten i und u bestimmten Werten y und den nach Gl. (5) berechneten Abtastwerten  $y_k$  minimal wird (vgl. Gl. (7)).

$$J = \sum_{i=k-N}^k (y_i - h(\underline{\Theta}_k))^2 \rightarrow \text{MIN} \quad (7)$$

In Gl. (7) stellt J das zu minimierende Gütekriterium dar. Als Funktion  $h(\underline{\Theta}_k)$  wird das in Gl. (5) angegebene Signalmodell eingesetzt. Die zu bestimmenden Parameter A, B und C bilden einen Vektor  $\underline{\Theta}_k$  gemäß Gl. (8).

$$\underline{\Theta}_k = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \quad (8)$$

Zur Lösung der Minimierungsaufgabe wird das Gütekriterium J nach dem Parameter-Vektor  $\underline{\Theta}_k$  abgeleitet. Für das Signalmodell nach Gl. (5) erhält man dann Gl. (9) mit Gl. (10).

$$0 = \sum_{i=k-N}^k 2\underline{\gamma}_i^T (y_i - \underline{\gamma}_i \underline{\Theta}_k) \quad (9)$$

$$\underline{\gamma}_i^k = \frac{\partial h}{\partial \underline{\Theta}_k} \quad \underline{\gamma}_i^k = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{T} i T_A\right) \cdot e^{\frac{i T_A}{\tau}} \\ \cos\left(\frac{2\pi}{T} i T_A\right) \cdot e^{\frac{i T_A}{\tau}} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Löst man Gl. (9) nach dem Vektor  $\underline{\Theta}_k$  auf, so entsteht die Gl. (11), mit der unter Nutzung der in den Gl. (12) und (13) angegebenen Matrix  $\underline{S}_k$  der Vektor  $\underline{\Theta}_k$  ermittelt wird.

$$5 \quad \underline{\Theta}_k = \underline{S}_k^{-1} \sum_{i=1}^k \underline{\gamma}_i^T y_i \quad (11)$$

$$\underline{S}_k = \sum_{i=k-N}^k \underline{\gamma}_i^T \underline{\gamma}_i \quad (12)$$

$$10 \quad \underline{S}_k = \begin{pmatrix} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} & \sin\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right)\cos\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} & \sin\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} \\ \cos\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right)\sin\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} & \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} & \cos\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} \\ \sin\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} & \cos\left(\frac{2\pi}{T}iT_A\right) \cdot e^{-\frac{iT_A}{\tau}} & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Von den im Vektor  $\underline{\Theta}_k$  enthaltenen Parametern A, B und C wird nur der Parameter C ausgewertet. Die Vektoren  $\underline{\gamma}_i^k$  nach Gl.

(10) und die Matrix  $\underline{S}_k$  nach Gl. (13) werden berechnet und  
15 als Konstanten abgelegt, so daß sie für alle Durchläufe des Verfahrens zur Verfügung stehen.

In der Pendelungserkennungseinheit Pe werden für die Erkennung des Pendelvorganges Monotoniekriterien auf die  
20 Bahnkurven der Impedanzwerte in der Impedanzebene angewandt. Dieses Verfahren für die Erkennung des Pendelvorganges an sich ist bekannt und in dem deutschen Patent DE 197 46 719 C1 beschrieben.

25 In der Pendelsignalrücksetzeinheit Pü wird festgestellt, ob eine bereits erkannte Pendelung noch anhält. Zu diesem Zweck wird aus vergangenen, zur Pendelung gehörenden Phasen-Impedanzwerten Z ein Pendel-Modell erzeugt. Anschließend wird

überprüft, ob die durch die neu ermittelten Phasen-Impedanzwerte  $Z$  beschriebene Bahnkurve noch dem Pendel-Modell entspricht. Bei der Erzeugung des Pendel-Modells wird davon ausgegangen, daß die Bahnkurve frei von Sprüngen ist und ihre Richtung nur sehr langsam ändert. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird die Bahnkurve durch eine Potenzfunktion erster Ordnung, also eine Geradengleichung, gemäß Gl. (14) beschrieben.

$$X(R) = m \cdot R + X_0 \quad (14)$$

Die Parameter  $m$  und  $X_0$  werden mittels eines nichtrekursiven Least-Squares-Schätzverfahrens aus den letzten  $N$  ermittelten Phasen-Impedanzwerten  $Z$  bestimmt.

15

Die Geradengleichung wird als Modellansatz für das Least-Squares-Schätzverfahren verwendet, der Parameter  $m$  charakterisiert die Steigung und der Parameter  $X_0$  den Offset der Geradengleichung. Aus den letzten ermittelten Wertepaaren  $(R_i, X_i)$  der Phasen-Impedanzwerte  $Z_i$  werden für das Modell nach Gl. (14) die Parameter  $m$  und  $X_0$  so bestimmt, daß die Summe der Fehlerquadrate zwischen den aus den gemessenen Phasenstrom- und Phasenspannungsabstastwerten  $i$  und  $u$  ermittelten Werten  $X_i$  und den nach Gl. (14) berechneten Werten  $X$  minimal wird (s. Gl. (15)).

25

$$J = \sum_{i=k-N}^k (X_i - h(\underline{\Theta}_k))^2 \rightarrow \text{MIN} \quad (15)$$

In Gl. (15) ist  $J$  das zu minimierende Gütekriterium, als

30

Funktion  $h(\underline{\Theta}_k)$  wird der Modellansatz gemäß Gl. (14) eingesetzt. Entsprechend Gl. (16) enthält der Parametervektor  $\underline{\Theta}_k$  die zu bestimmenden Parameter  $m$  und  $X_0$  des Modellansatzes.

$$\underline{\Theta}_k = \begin{pmatrix} m \\ X_0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Zur Lösung der Minimierungsaufgabe muß das Gütekriterium  $J$  nach dem Parametervektor  $\underline{\Theta}_k$  abgeleitet werden. Für das

5 Signalmmodell nach Gl. (14) erhält man dann die Gleichungen (17) und (18).

$$0 = \sum_{i=k-N}^k 2\underline{\gamma}_i^T (X_i - h(\underline{\Theta}_k)_i) \quad (17)$$

$$10 \quad \underline{\gamma}_i^k = \frac{\partial h}{\partial \underline{\Theta}_k} = \begin{pmatrix} R \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Löst man Gl. (17) nach dem Parametervektor  $\underline{\Theta}_k$  auf, so entsteht Gl. (19) zur Ermittlung des Parametervektors  $\underline{\Theta}_k$ .

$$15 \quad \underline{\Theta}_k = \underline{S}_k^{-1} \sum_{i=1}^k \underline{\gamma}_i^T y_i \quad (19)$$

mit

$$\underline{S}_k = \sum_{i=k-N}^k \underline{\gamma}_i^T \underline{\gamma}_i \quad (20)$$

$$20 \quad \underline{S}_k = \sum_{i=k-N}^k \begin{pmatrix} R_i^2 & R_i \\ R_i & 1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Nach Einsetzen der Parameter in Gl. (14) erhält man das geschätzte Pendel-Modell. Entspricht ein neu bestimmter Phasen-Impedanzwert  $Z$  dem Pendel-Modell, d. h. liegt er in einem Toleranzband um die durch Gl. (14) dargestellte

25 Geradengleichung, so wird ein Anhalten der Pendelung erkannt. Liegt der neu bestimmte Phasen-Impedanzwert  $Z$  außerhalb des Toleranzbandes, so wird das Aufhören der Pendelung erkannt und am Ausgang der Pendelsignalrücksetzeinheit  $Pü$  ein

Pendelrücksetzsignal Pr für das Speicherelement Sp1, Sp2 oder Sp3 der jeweiligen Phase ausgegeben.

- Die Einheit Phasenauswahl Pa erhält beispielsweise von einem nicht dargestellten Distanzschutz eine Anregung. Entsprechend der Art der angeregten Schleife ermittelt sie die Phasen, für die die Pendelungserkennungseinheit Pe bzw. die Pendelsignalrücksetzeinheit Pü eine Untersuchung des Pendelverhaltens durchführen soll. Eine Zuordnung der angeregten Schleifen zu den Phasen ist in der folgenden Tabelle angegeben.

angeregte Schleifen	auf Pendelverhalten zu untersuchende Phasen
L1E	L1
L2E	L2
L3E	L3
L12	L1 und L2
L23	L2 und L3
L31	L1 und L3

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Erzeugen von mindestens einem eine Pendelung  
in einem elektrischen Energieversorgungsnetz anzeigenden  
5 Signal (Pendelsignal Pd), bei dem
- von mindestens einer Phase des Energieversorgungsnetzes  
jeweils Phasenstrom und Phasenspannung unter Bildung von  
Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerten (i, u)  
abgetastet werden,
  - 10 - aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerten  
Impedanzwerte gebildet werden,
  - die Impedanzwerte auf das Vorliegen einer Pendelung hin  
überwacht werden und bei Erkennung einer Pendelung  
mindestens ein Speicherelement (Sp) gesetzt und an dessen  
15 Ausgang das Pendelsignal (Pd) ausgegeben wird,
  - nach Setzen des Speicherelementes (Sp) weitere  
Impedanzwerte dahingehend überprüft werden, ob die  
festgestellte Pendelung noch anhält,
  - bei Anhalten der Pendelung das Speicherelement (Sp)  
20 unbeeinflusst bleibt und beim Aufhören der Pendelung das  
Speicherelement zurückgesetzt wird,
- d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß
- bei der Überprüfung der weiteren Impedanzwerte ein Pendel-  
Modell benutzt wird, das aus vergangenen, zur Pendelung  
25 gehörenden Impedanzwerten oder aus von diesen  
Impedanzwerten abhängigen Größen gebildet ist,
  - überprüft wird, ob ein aktuell gebildeter weiterer  
Impedanzwert oder eine von diesem weiteren Impedanzwert  
abhängige Größe vom Pendel-Modell abweicht und
  - 30 - ein Auftreten eines weiteren Impedanzwertes oder einer von  
diesem Impedanzwert abhängigen Größe, welche von dem  
Pendel-Modell abweichen, als ein Aufhören der Pendelung  
gewertet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, daß  
5 das Pendel-Modell mittels eines Least-Squares-Schätzverfahrens ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet, daß  
10 als Modellansatz für das Pendel-Modell  
- eine Funktion der Form  $f(x)=ax^3+bx^2+cx+d$  mit den Parametern a, b, c und d, bei der ein oder mehrere Parameter von vornherein als Null festgelegt werden können oder  
15 - eine Summe aus abklingenden Sinus- und Cosinusfunktionen verwendet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

dadurch gekennzeichnet, daß  
20 als von den Impedanzwerten abhängige Größe Resistanzwerte (R) verwendet werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

dadurch gekennzeichnet, daß  
25 als von den Impedanzwerten abhängige Größe Reaktanzwerte (X) verwendet werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

dadurch gekennzeichnet, daß  
30 als von den Impedanzwerten abhängige Größe zeitliche Ableitungswerte ( $dZ/dt$ ) der Impedanz verwendet werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

dadurch gekennzeichnet, daß



als von den Impedanzwerten abhängige Größe zeitliche  
Ableitungswerte ( $dR/dt$ ) einer Resistanz verwendet werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß  
als von den Impedanzwerten abhängige Größe zeitliche  
Ableitungswerte ( $dX/dt$ ) einer Reaktanz verwendet werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

10 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß  
aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerten ( $i$ ,  $u$ )  
Mitsystemimpedanzwerte gebildet werden und für alle Phasen  
des Energieversorgungsnetzes ein gemeinsames Speicherelement  
( $S_p$ ) bereitgestellt und ein gemeinsames Pendelsignal ( $P_d$ )  
15 erzeugt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß  
aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerten ( $i$ ,  $u$ )  
20 jeweils einer auf Pendelung zu untersuchenden Phase des  
Energieversorgungsnetzes Phasen-Impedanzwerte gebildet werden  
und für jede dieser Phasen ein eigenes Speicherelement ( $S_p$ )  
bereitgestellt und ein eigenes Pendelsignal ( $P_d$ ) erzeugt  
wird.

25

11. Verfahren nach Anspruch 10,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß  
zur Bildung der Phasen-Impedanzwerte  
- aus den Phasenstrom- und Phasenspannungsabtastrwerten ( $i$ ,  $u$ )  
30 der jeweiligen Phase eine den Realteil der  
Phasenspannungsabtastrwerte enthaltende Größe  $U_{re}$ , eine den  
Imaginärteil der Phasenspannungsabtastrwerte enthaltende Größe  
 $U_{im}$ , eine den Realteil der Phasenstromabtastrwerte  
enthaltende Größe  $I_{re}$  und eine den Imaginärteil der  
35 Phasenstromabtastrwerte enthaltende Größe  $I_{im}$  erzeugt wird,

- eine Phasen-Wirkleistungsgröße  $P$  gemäß
$$P = U_{re} \cdot I_{re} - U_{im} \cdot I_{im}$$
 ermittelt wird,
- eine Phasen-Blindleistungsgröße  $Q$  gemäß
$$Q = U_{im} \cdot I_{re} + U_{re} \cdot I_{im}$$
 ermittelt wird,
- 5 - eine quadrierte Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  gemäß
$$I^2 = I_{re} \cdot I_{re} + I_{im} \cdot I_{im}$$
 ermittelt wird,
- mittels jeweils eines Least-Squares-Abschätzverfahrens netzfrequente Anteile aus der Phasen-Wirkleistungsgröße  $P$ , der Phasen-Blindleistungsgröße  $Q$  und der quadrierten
- 10 Phasenstromamplitudengröße  $I^2$  entfernt werden und
- Phasen-Resistanzwerte  $R$  gemäß  $R=P/I^2$  sowie Phasen-Reaktanzwerte  $X$  gemäß  $X=Q/I^2$  und damit Phasen-Impedanzwerte  $Z=R+jX$  ermittelt werden.

## Zusammenfassung

### Verfahren zum Erkennen einer Pendelung in einem elektrischen 5 Energieversorgungsnetz

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erzeugen von  
mindestens einem eine Pendelung in einem elektrischen  
Energieversorgungsnetz anzeigenden Signal (Pendelsignal). Um  
10 stets sicher und zuverlässig das Pendelverhalten eines  
elektrischen Energieversorgungsnetzes festzustellen, wird ein  
Pendel-Modell benutzt, das aus vergangenen, zur Pendelung  
gehörenden Impedanzwerten oder aus von diesen Impedanzwerten  
abhängigen Größen gebildet ist. Es wird überprüft, ob ein  
15 aktuell gebildeter weiterer Impedanzwert oder eine von diesem  
weiteren Impedanzwert abhängige Größe vom Pendel-Modell  
abweicht und ein Auftreten eines weiteren Impedanzwertes oder  
einer von diesem Impedanzwert abhängigen Größe, welche von  
dem Pendel-Modell abweichen, als ein Aufhören der Pendelung  
20 gewertet.

FIG 1